数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析

陈晓红[1,2]　胡东滨[2*]　曹文治[1]　梁 伟[1]　徐雪松[1]　唐湘博[1]　汪阳洁[2]
1 湖南工商大学 前沿交叉学院 长沙 410205
2 中南大学 商学院 长沙 410083

摘要 数字经济时代下数字技术是实现我国碳中和目标的最佳工具。能源行业是我国碳排放的最大来源部门，如何借助数字技术实现能源行业碳达峰与碳中和目标广受关注。文章首先阐释了数字技术在碳中和中的重要战略作用；然后，就已有文献中数字技术与碳减排的相关理论研究与应用进展进行了梳理分析，揭示了现有数字技术应用于能源行业碳中和存在的问题；最后，提出了数字技术推动我国碳中和进程的总体思路，以及大数据、数字孪生、人工智能、区块链等数字技术助力实现我国能源行业碳中和目标的主要路径。

关键词 数字技术，碳中和，能源行业，路径

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210807004

气候变化给人类生存和发展带来日益严峻的挑战，及早实现碳达峰、碳中和成为保护地球家园的全球共识。据联合国气候变化框架公约（UNFCCC）报告，截至 2019 年 9 月全球已有 60 个国家承诺到 2050 年实现净零碳排放；除美国、印度之外，世界主要经济体均相继做出了减少碳排放的承诺 [1]。从 2014 年的《中美气候变化联合宣言》，到 2020 年第 75 届联合国大会，再到 2021 年中央经济工作会议和“十四五”规划，党和国家领导人一直高度重视碳达峰、碳中和工作并提出了明确要求。然而，中国承诺实现从碳达峰到碳中和的时间，远远短于发达国家所用时间，需要中方付出艰苦努力。

随着数字技术（digital technology）在资源、能源和环境领域的深度融合与应用创新，数字技术在实现碳中和目标中的作用日益受到关注。数字技术是一项与计算机相伴相生的科学技术，将各种信息转化为计算机能识别的二进制数字后进行运算、加工、存储、传送、传播和还原，其本质在于提高整个社会的信息

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金基础科学中心项目（72088101），国家自然科学基金重大项目（71991465），中国工程院战略研究与咨询项目（2021-HYZD-13），中国工程院院地合作重大项目（2020-CQ-ZD-2）
修改稿收到日期：2021年8月30日

化、智慧化水平，提升资源配置效率[2]。尽管气候变化威胁人类生存和发展，但生产和生活对能源和矿产资源的需求仍不断增加。2020年我国化石能源占一次能源消费比重高达84.1%，能源相关的碳排放约为每年98亿吨，占全社会碳排放总量的近90%[3]。数字技术正是解决能源和矿产资源利用与生产生活需求矛盾的核心所在。随着数据通信技术的快速发展，以智能传感、云计算、大数据和物联网等技术为代表的数字技术有望重塑能源系统。数字技术在碳足迹、碳汇等领域的深度融合可以促进能源行业的数字化监测、排放精准计量与预测、规划与实施效率提升，从而大幅提升能源使用效率，直接或间接减少能源行业碳排放量[4]。此外，数字技术引领的新业态、新模式变革还可以助推能源消费理念转变，重构能源商业模式，助力我国碳达峰、碳中和目标的实现。

因此，面向国家实现碳达峰、碳中和目标的重大需求，本文意在探索数字技术支撑我国碳中和目标实现的作用，并特别聚焦大数据、人工智能（AI）、区块链、数字孪生（digital twin）等数字技术在碳汇精准计量、能源高效调度、能源市场运营、碳中和精准规划等方面助推我国能源行业碳中和的有效路径。

1 数字技术在碳中和中的战略作用

碳达峰、碳中和面临的本质问题主要有2点不确定性：① 经济活动影响的不确定性；② 减排路径的不确定性。这2种不确定性的根源在于信息不对称、数据不充分和精准预测能力不足，而这正是数字技术可以破解的问题。因此，在国家持续推进能源领域数字化转型背景下，加强我国能源行业数字技术融合创新及应用对实现碳中和目标具有重要战略意义。

（1）数字技术可以有效促进能源供给侧和消费侧的协调。在能源供给环节，物联网、云计算、大数据等数字技术可以提高能源采集效率与在线互联程度，实现能源供给环节的集约化、数据化、精细化，为能源生产运行提供安全可靠的技术支撑。在能源消费环节，人工智能等数字技术将颠覆传统的能源消费理念，催生新的能源消费方式，推动各行业的消费转变，降低能源消耗量及消耗强度[5]。

（2）数字技术在能源行业的深入应用助推能源清洁生产。随着科技革命和产业变革的进程不断加快，数字经济逐渐成为价值创造的引领者。目前，世界各国均积极布局数字化转型，将云计算、人工智能、物联网、分布式管理等数字技术，运用到能源生产、输送、交易、消费和监管等各个环节[6]。

（3）数字技术创新能源新模式、新业态，推动能源绿色消费。长期以来，我国形成了以电力、石油、天然气等系统为核心的能源消费体系。该体系内部刚性关联日益增强，整体上又表现出较强的独立性，因而造成能源系统整体效率偏低，并成为能源产业转型升级和结构调整的障碍。数字技术的应用既能优化整合能源业务，打破“能源竖井”，又能实现多能融合，促进整个产业链的效率提升。

综上所述，数字技术对我国实现碳达峰、碳中和目标发挥着关键作用。亟须主动把握和引领新一代信息技术变革趋势，转变生产管理理念，从能源生产、供给、管理、服务等方面进行全方位的数字化转型，推进能源绿色转型，努力探索数字技术助推我国碳中和目标实现的有效路径。

2 数字技术对碳排放的影响研究进展与问题

数字技术对碳排放的影响及相关应用研究日益增多，以下简要从数字技术与碳足迹、数字技术与碳汇等领域简述现有研究及应用进展和存在的不足。

2.1 数字技术对碳足迹的影响研究

数字技术对碳足迹的影响具有正、反两方面。一方面，数字技术可以带来效率收益，促进能源资源和矿产资源安全绿色智能开采和清洁高效低碳利用，有利于实现能源消费供需平衡，减少碳足迹。另一方

面，数字技术本身也可能引致更多能源消耗，特别是对电力的大量需求。

（1）能源互联网的发展是数字技术在碳排放领域中的一大尝试。通过将数字技术、分布式能源生产和利用技术，以及储能技术的高效融合，实现能源从供给侧的生产、传输到需求侧的消费、服务变得可计量、可控制和可预测，使能源互联网成为能源系统重要的战略资源和平台[7,8]。借助能源互联网可以实现能源需求侧和供给端的双向互动，实现碳足迹的可定位和可溯源。国内外学者就能源互联网的核心概念和框架、能源互联网系统的设计和运行及其所涉及的信息技术支持和未来规划开展了相关研究，包括能源产消者、微电网、虚拟电厂、智能电网和能源网络安全框架等内容[9-14]。例如，智能电网结合数字化网络，以通信信息为平台，可以实现发电、输电、变电、配电、用电和调度等过程信息化、自动化及人机互动。通过削减能源采用成本、减少电力浪费、降低石油依赖度等直接或间接的作用机制，智能电网可将传统电网的碳足迹至少降低12%[15]。

（2）煤炭行业是数字技术融合应用的另一重要领域。煤炭作为我国能源结构中的主要消费能源，为我国经济发展和能源安全筑造了坚实基础，但也带来了较大规模的温室气体排放和环境污染。随着数字技术和现代化煤炭开发技术的应用，煤炭开采实现了综采装备、巷道掘进装备、运输装备等智能化变革，初步形成煤炭智能开采格局，并有效降低了碳排放[16,17]。比如，借助数字孪生技术和5G通信技术的发展，可实现无人化、可视化精准勘探、开采和全方位智能监控，这不仅显著提高开采效率，同时也降低对生态环境的破坏[18,19]。此外，物联网技术在煤炭开采过程中已经实现实时数据收集、处理和分析，通过部署智能设备以减少运营过程中的安全和环境风险[20]。

（3）数字技术通过助力企业管理转型，亦可不断提高企业碳排放效率。《2019年全球数字化转型收益报告》显示，在施耐德电气公司和全球41个国家的合作伙伴完成的230个客户项目中，部署数字技术平台的企业，其节能降耗幅度最高达85%，平均降幅24%；节约能源成本最高达80%，平均节约28%；二氧化碳（CO_2）足迹优化最高达50%，平均优化20%①。由世界经济论坛和埃森哲咨询公司共同发布的《实现数字化投资回报最大化》显示，当公司将先进的数字技术融入生产时，其生产效率提升幅度可达70%，而数字化部署较为缓慢的公司，其生产效率仅提高30%②。由此可见，数字技术不仅能够带来效率收益，更能助力低碳生产。

（4）以数据中心和比特币为代表的高能耗数字技术可能挤占一定的能源消费空间，产生额外的碳足迹，不利于能源的绿色可持续发展。研究表明，在智能设备方便生活的同时，大量数据传输和远程处理均需要数据中心的支持，而数据中心的运转消耗了大量能源[21,22]。2014年，美国数据中心耗电量约占当年用电总量的2%，已然超过高耗能的造纸业用电量[23]。根据中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究，2018年中国数据中心总耗电约1 600亿千瓦时，相当于三峡水电站全年发电量③。此外，自2008年比特币诞生后，其高耗能的设计对能源发展构成了极大威胁[24]。在没有外部政策影响的情况下，中国比特币产业预计2024年将耗能296.59太瓦时，产生约1.305亿吨碳排放，成为中国实现碳中和目标的一大障碍[25]。

2.2 数字技术对碳汇的影响

对于已经排放的CO_2，需要借助农林碳汇，海洋碳汇，碳捕集、利用和封存（CCUS），生物质

① https://www.schneider-electric.cn/zh/work/campaign/roi-report/.
② http://reports.weforum.org/digital-transformation/files/2018/05/201805-DTI-Maximizing-the-Return-on-Digital-Investments.pdf.
③ http://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2019/09/点亮绿色云端：中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究.pdf.

能碳捕集与封存（BECCS），以及直接空气碳捕获（DAC）等负排放技术完成碳中和。对土壤、作物、森林等环境要素进行数字化采集、存储和分析，已成为数字技术在碳汇方面的一大应用。

（1）借助可视化模拟、物联网、智能决策等技术建立起的数字化森林资源监测系统，能够实现高实效、高精度森林资源动态监测。例如，利用卫星遥感和地面监测设备对草原信息进行精准收集，能够把握草原环境基本数据并运用到草原生态恢复和治理，助力草原碳汇功能提升[26]。

（2）海洋碳汇因固碳效率高和储存长久性等特点，在全世界范围内得到了政策支持和科学研究。例如，智慧海洋借助海洋实测数据、遥感数据、海洋经济数据等大数据技术，射频识别、无线传感等物联网技术，实现了海洋生态保护、经济发展及灾害防控等目标[27]。但如何利用智慧海洋相关技术向碳汇核算和计量方向发展，尚处于初步探索阶段。

（3）CCUS 技术被认为是实现碳达峰、碳中和目标的重要技术选择之一。自 2000 年 CCUS 技术引入到我国后，经 20 多年的发展已初步建立起一定的技术体系。目前，CCUS 技术多聚焦于物理、化学和地质理论，以及技术解决碳排放的捕集、利用和封存[28]，而尚未开展与数字技术进行深入融合的研究。在 BECCS 技术应用领域，目前主要在生物质发电技术研发，以及如何与生物质气体、生物质燃料和生物液体等结合方面进行了初步探索[29]。

2.3 数字技术应用于能源行业碳中和存在的问题

整体而言，如何借助快速发展的数字技术实现能源行业碳中和的路径机理研究尚处于初步探索阶段。从主要文献梳理来看，至少在 4 个方面有待进一步开展理论和应用探究。

（1）大数据、物联网、数字孪生等技术在碳足迹监测、碳汇测量等领域的研究与应用远远不足。关于碳排放监测尚未形成一体化模式，空间、地面和城市碳等监测平台并未整合，仍是割裂的数字化监测平台，未形成天地空一体化的整体研究模式[30]。

（2）能源网络数字化整合相对滞后，借助云计算和云存储等实现能量流供需平衡与高效运转的研究有待强化。由于信息不对称，庞大的能源互联网系统在适应及协调整体网络时，仍存在信息融合不协调、高负荷运行下不能及时筛选及处理有用信息等问题[31]。高效计算、模型化简、辅助求解等数字化计算方法仍是解决和支撑能源互联网高效运转的关键技术和研究方向。

（3）与碳足迹相比，数字技术在碳汇方面的研究有很大的提升空间。已有不少文献研究了农林和海洋在碳汇上所起的作用，但尚未形成“可衡量、可报告、可核查”的数字化智能观测和评估体系[32]。亟待探究如何借助大数据、AI 等技术对碳汇的存量、形成机理和功能建立更加具象的监测机制，并有效纳入能源碳中和网络。

（4）面对碳达峰、碳中和目标新要求，传统的碳排放与碳吸收计量与预测存在精准度不高、预测效果不佳等问题。一方面，碳排放因子体系有待优化。碳排放的影响因素复杂多样，简单采用人均国内生产总值（GDP）、人口规模、城镇化率、技术水平、第二产业占比等指标作为碳排放驱动因子[33]，无法有效支撑对碳排放和碳吸收的全面精确计量。另一方面，预测效果有待进一步提升。受时间跨度长、未来政策变化等不确定因素影响，各部门各地区的经济活动之间存在复杂关系，对于不同时期、不同情景下的碳达峰与碳中和进程难以实现有效预测。

3 数字技术助力能源行业碳中和目标实现路径

基于前述研究，本文聚焦碳中和进程中的数据监测、碳排放与吸收测算、碳达峰与碳中和进程预测、碳达峰与碳中和路径和相关政策规划及实施等工作，

探索大数据、数字孪生、AI、区块链等技术实现能源行业碳中和目标的主要路径（图1）。

3.1 大数据技术实现碳排放精准计量及预测

对能源行业碳达峰与碳中和进程进行计量和预测，并评估不同技术条件和政策情景下的差异是一项复杂的系统工程，涉及对能源行业各部门经济活动碳排放水平的测算、对自然环境碳吸收水平的估测，以及对社会经济发展的推演等一系列科学问题[34]。利用大数据技术和方法开展碳排放和碳吸收计量及预测，能够有效解决精准度不高和预测效果不佳的问题。

（1）大数据技术实现对排放因子的优化调整。对能源行业各部门经济活动的碳排放水平测算时，要对排放因子进行动态调整以避免不确定扰动因素的干扰。采用大数据方法对大气 CO_2 浓度变化趋势和 CO_2 净排放量变化趋势进行分析，确定排放因子设定造成的趋势差异影响；再通过聚类分析和关联规则分析，确定因子之间内部关联性；然后将具有相似特征的区域聚合成一类，构建能够消减差异的最优排放因子组合，实现能源碳排放驱动因子体系协同、高效地发挥作用。

（2）大数据技术实现碳排放和碳吸收的全面精确计量。运用大数据技术，可以实现日频度、月频度的能源碳排放动态监测核算，不仅缩短计量分析周期、提高计量精度，还降低计量成本，提高计量效率[35]。通过对不同区域、不同主体的碳排放数据进行分析，动态跟踪碳排放变动趋势；对碳排放与碳捕捉、碳封存联系结果进行分析，实现对 CO_2 全生命周期变动的监测追踪[36]；结合地理与生态环境的变化对碳排放和碳吸收水平的演化规律进行分析，反演大气中 CO_2 浓度值和浓度变化趋势，实现对碳排放和碳吸收的全面精准计量。

（3）大数据技术实现多情景碳达峰、碳中和进程的精准预测。综合大数据优势构建能源碳排放趋势预测模拟系统，实现对碳排放的追踪和长期预测；通过模拟不同技术条件和政策情景下各地区各行业经济活动能耗变化情况，追溯生产过程中能源消耗；通过分

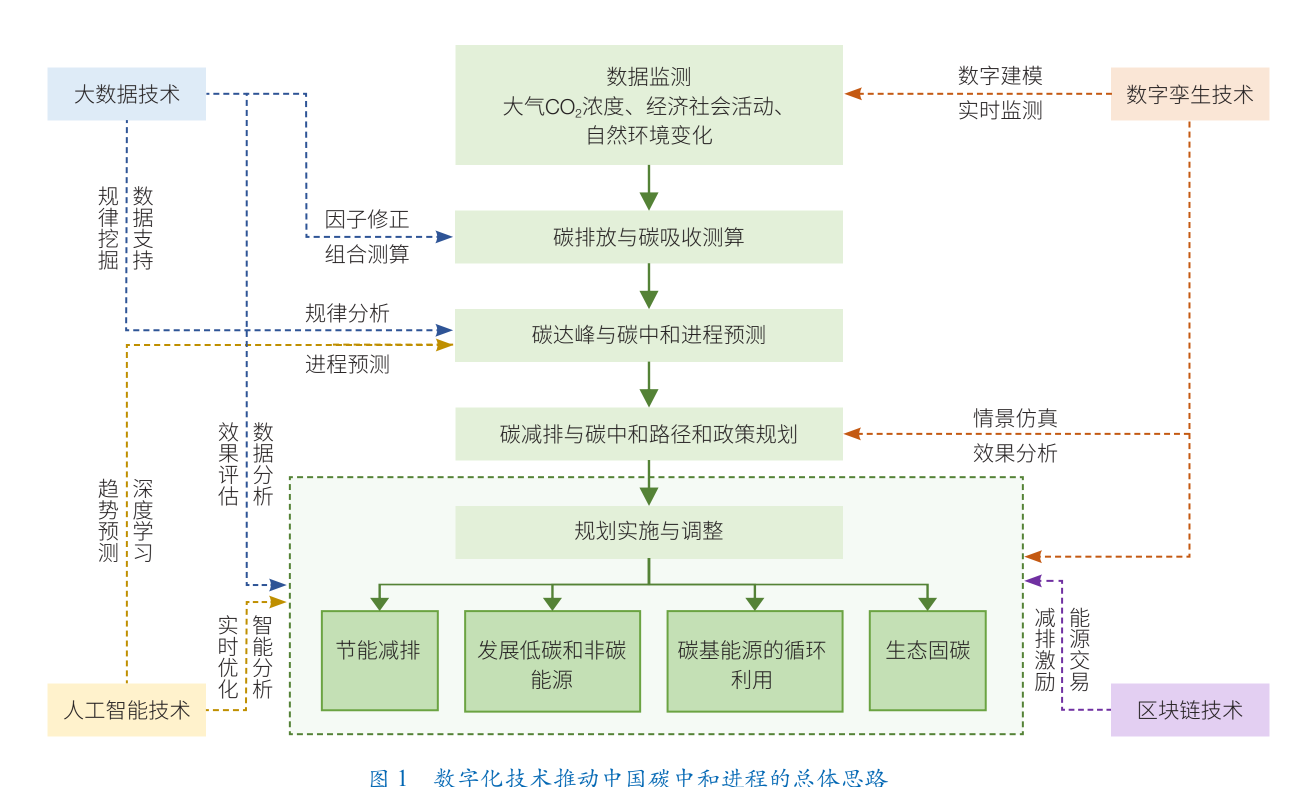


图1 数字化技术推动中国碳中和进程的总体思路

Figure 1 General framework of digital technology promoting carbon neutralization process in China

析经济活动发展变化规律，测算多种情景下人类活动和自然界净碳排放的逐年变化，实现对碳达峰、碳中和时间的精准预测[33]。

3.2 AI实现能源高效调度利用

AI技术是解决复杂系统控制与决策问题的有效措施，在能源行业的深入应用，有助于推动清洁能源生产，降低碳排放以实现由高碳向低碳、再由低碳向碳中和的转变。在能源行业，降低能耗成本和减少污染物排放同等重要[37]。因此，在确保能源系统供能可靠性和高质性的同时，应用AI技术实现能源高效调度和利用，成为世界各国碳减排的重要实践举措。

（1）碳中和对能源调度提出了智能化需求。现代能源系统规模庞大、结构复杂，碳中和下的智能调度在保障系统安全、稳定运行的同时还要提高其经济性。AI技术的发展对能源调度提出了更高需求，如：煤炭运输过程中实现传送带异常情况检测、电力传输过程中监测线路状况及灵活调配实现电力高效使用、油气储运实施安全监测、突发公共事件实现有效能源调度等。经济社会的发展、人民生活水平的提高、碳中和愿景的约束对能源调度提出了智能化、高效化需求。

（2）AI助力实现能源精准调度。AI技术发展为实现能源高效智能调度提供了实现的可能。基于机器学习的智能算法被广泛应用于求解能源调度的最优方案，如正余弦优化算法（SCA）[38]、基于柔性行动器-评判器框架的深度强化学习方法（ALFRED）[39]等，提高了调度准确性和有效性。例如：电力传输领域，利用机器视觉实现对输电通道安全状况的实时监控及全程评估；煤炭运输领域，通过智能传输机实现对传输带上的异物、转载点堆煤等情况的识别；油气储运领域，通过目标检测实现对石油管道焊缝缺陷检测，避免石油运输过程中产生的不必要浪费。

（3）AI助力实现能源高效利用。国内外能源企业的AI应用为实现能源高效利用带来启示。英国Grid Edge公司通过操作VPN连接、分析用户的能源消耗数据，实现能源节约并避免超载。日本关西电力株式会社基于机器学习对智能电表数据进行总结，利用高精度AI算法实现多种模式用电方式优化。在国内，大唐集团有限公司通过先进通信技术和软件架构实现3D虚拟电厂，实现空间地理位置分散的聚合和协调优化，其智能控制系统实时管控生产电力过程、完成能源储存与合理配置。南方电网广东中山供电局依托智能电网开展调控一体化精益管理，把大数据、机器学习、深度学习等技术与电网融合，打造调控一体化智能技术应用示范区。华南理工大学正致力于新一代能源电力系统的研究，构建新一代电力系统和能源互联网融合的智慧能源机器人，关注能源服务体系数字化转型，实现能源调度的自动化[40]。

3.3 区块链技术实现能源市场高效运转和低碳行为的激励

未来能源交易市场具有多主体、多模式、多规则的特点，这对能源市场交易透明性、实时性、数据安全性提出了需求与挑战。面向“放开两端”能源交易市场服务要求的“主体对等、智能互信、交易透明、信息共享”，结合区块链技术的“去中心化，透明安全，不可篡改，信息可溯”四大技术特征，形成新型分布式能源交易市场，可以为我国碳中和目标实现提供具体实施手段。

（1）区块链技术推动分布式能源市场创新。① 区块链实现能源交易市场的安全可信交易与高效结算。利用区块链技术构建分布式能源账本，对能源市场的供电前端交易数据、营销数据、用户用电数据上链，实现分布式的记账存储；利用区块链不可篡改的记录保管方式，精简数据输入存储的过程，规避人为错误和恶意篡改；通过智能合约将交易、清算等业务自动化，实现交易即结算，减少清算过程中的错误和摩擦。② 区块链实现能源交易市场的自动化业务处理。通过智能合约自动执行能源市场的交易过程及其他能源业务，根据能源实时供需关系生成实时能源价格，

交易完成后自动触发能源传输和控制，实现全网能源调度平衡。③ 区块链实现能源交易市场的资源优化配置。通过链上代码、智能合约确定能源交易及调度规则，统筹交易市场利益主体，聚合不同类型的分布式供电端，实现整体的协调优化运行；通过个性化能源价格和综合能源优化调度提高清洁能源在市场交易中的消费占比，促进能源合理消纳。

（2）区块链技术优化能源市场架构及交易流程。① 区块链技术优化分布式能源市场基本系统架构。基于区块链的能源市场能够实现分布式能源交易过程中的异构设备互联、交易信息互联，使不同主体、硬件设备与交易系统之间高效交互。总体架构划分为基础层、引擎层、业务层和应用层 4 个层次（图 2）。其中，基础层提供交易平台基础架构支撑，封装了底层数据区块，以及数据加密和时间戳等技术，实现链下数据存储。引擎层封装了网络节点的共识算法，支撑智能合约的构建，实现能源交易合约、能源定价合约、能源调度合约，以支撑基于区块链的分布式能源市场业务需求。业务层通过智能合约实现能源市场业务。应用层则封装了各种场景和案例。② 区块链技术完善能源市场交易流程（图 3）。首先，源端用户（卖方）发布供电信息，平台定价合约根据源端用户和供电情况进行价格设定并上链。其后，用消费端用户（买方）发布需求信息并由平台进行撮合，或者由用户查询源端供电信息直接交易，交易触发平台交易合同。在检查交易双方资格和条件允许后，触发交易合约，合约冻结买方账户金额。系统后台将验证合约，若失败则通知用户。验证通过的合约将存储至区块链系统并触发调度合约，开始进行能源调度和传输。在交易各个阶段，政府可参与制定碳中和政策影响交易市场运行。在整个交易过程中，除包括源端和消费端之外，还涉及电网输送、政府等能源传输与调控参与方。

（3）区块链技术实现碳中和低碳行为激励。采用区块链构建能源交易市场，并建立激励体系能有效激励低碳行为。一般采用区块链通证实现能源市场的通证经济，提升对低碳行为的附加经济效益；另外，采用智能合约按照激励规则与模式对低碳行为进行能源优先调度也可激励低碳行为。具体措施包括：① 节能电力调度。摒弃平均调度原则，减免可再生能源和具有更高能源效率和更少污染物排放的供电方能源传输的费用，或对这些能源优先调度。② 用电需求侧低

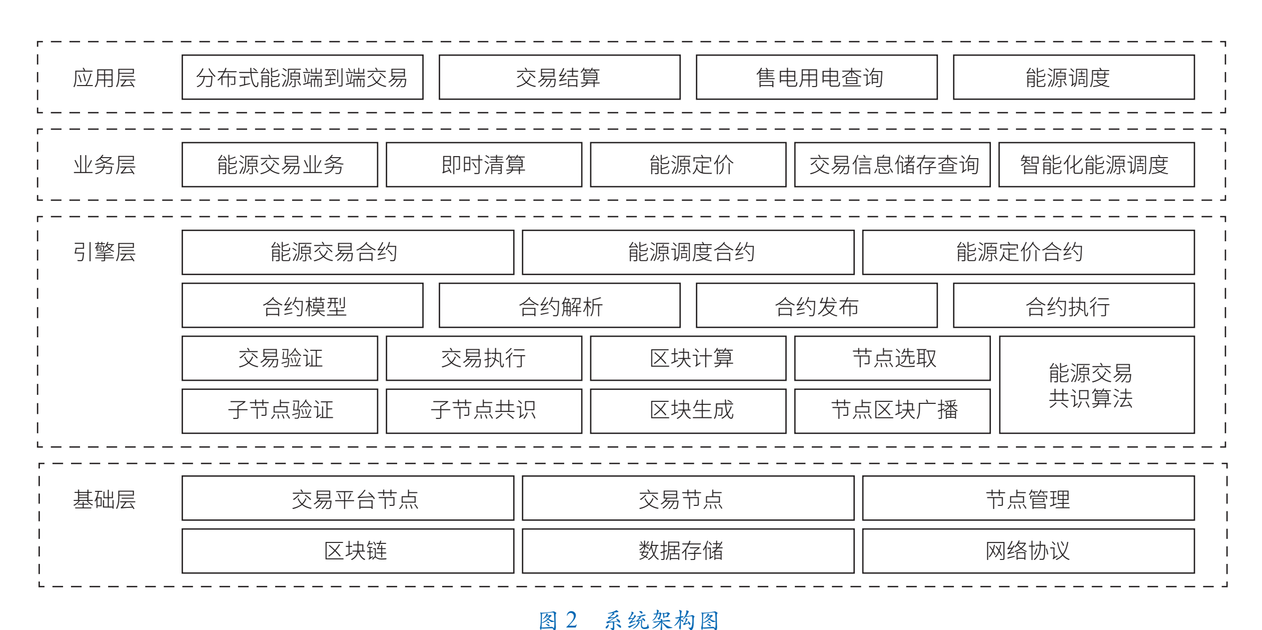


图 2　系统架构图
Figure 2　System architecture diagram

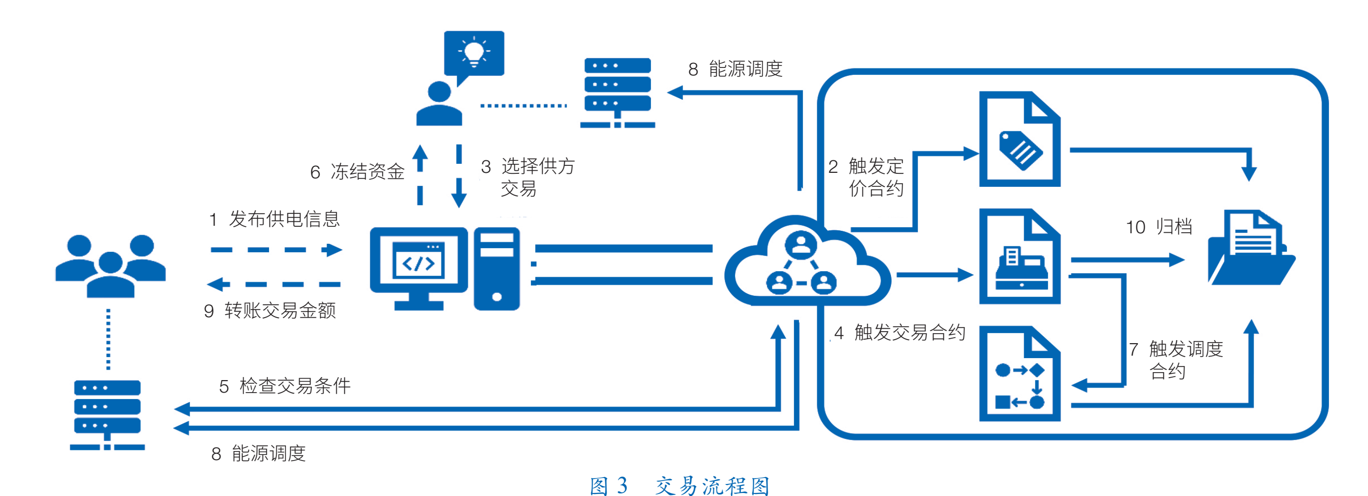


图 3 交易流程图
Figure 3 Transaction flow chart

碳激励。通过激励降低消费者总体能源需求，控制需求在高峰和低谷间转换；通过激励促进消费者使用更有效率的高耗能电器实现碳中和。③ 低碳通证交易。类似于排污权交易，通过市场机制激励低碳行为，解决碳排放的环境外部性问题。

3.4 数字孪生技术助力碳减排与碳中和精准规划

数字孪生是一种实现真实物理环境向信息空间数字化模型映射的关键技术；其通过数字化方式创建物理实体的虚拟实体实现模拟、验证、预测和控制物理实体全生命周期过程，充分利用布置在物理系统各部分的传感器，对物理实体进行数据分析与建模，将物理实体在不同真实场景中的全生命周期过程反映出来[41]。

在能源行业碳达峰、碳中和目标的实现上，如何建立实时碳足迹追踪与全生命周期的评估体系是一大现实难题。需要健全从碳排放数据采集、监测到碳中和精准规划的全生命周期数字化管理。因此，基于数字孪生技术的二维或三维的可视化碳地图模型建立，构建排放驱动因素追踪、减排动态模拟推演、能耗告警检测分析等能力，从而建立清晰的碳排放监测、管控、规划和策略实施路径。

（1）数字孪生技术实现社会及企业的碳排放精准监测和计量。数字孪生技术作为推动实现企业及城市治理全面数字化转型、促进碳减排的重要抓手，可在绿色产品设计、绿色制造、绿色智慧城市、绿色工程建设等领域起到重要的推动作用。在实现社会碳排放精准监测和计量方面，美国、欧盟等国家和地区在该领域的研究相对较成熟。美国环保署采用 CEMS 数据及数字孪生技术对 2015 年美国 73.9% 的火电机组应用连续监测，模拟和仿真全流程运行状态，实时开展碳排放数据监测；在欧盟碳交易体系下，德国、法国、捷克等国利用数字孪生技术研发了新型碳监测系统，实现碳排放核算的实时化、精准化和自动化。从国内碳市场的发展来看，行业内工艺流程的不断更新会使得监管部门管理难度明显提升，监管标准不断升级，对碳排放监测灵活性、精准性及实时性提出更高要求。因此，我国采用数字孪生等技术开展碳排放在线监测也开始逐步落地。南方电网采用通过 CO_2 在线监测系统（CDEMS）及数字孪生可视化监测项目、性能指标、安装要求、数据采集处理方式及质量保证，通过建立一套包括“指令-标准-运行保障”数字化运行管控体系，实现对温室气体排放监测管理。

（2）数字孪生技术助力碳减排与碳中和精准规划实施。在碳减排与碳中和精准规划实施方面，数字孪生技术依然可以发挥巨大作用。① 通过数字孪生建模模拟构建经营过程中的碳排放情况，夯实碳管理的基

础。包括企业自身机构的碳排放、企业所生产的产品和服务的碳足迹、上下游价值链碳排放，以及企业通过自身的产品服务所带来的碳减排潜力。② 通过数字孪生统计和分析碳中和路径，设定与碳中和目标相一致的规划目标。通过全过程数字链条的构建及数字画像，把碳减排与企业核心业务密切结合，将规划和行动精准匹配，推动低碳转型和技术创新，从而为制定措施开展减排行动规划的修改和优化提供直接参考。例如，在工业生产中，采用数字孪生实现对生产全过程的实时动态跟踪与回溯，全面分析人、机、料、法、环、测等生产过程关键影响因素，挖掘碳排放过程中隐藏的“改善源”及解决方案。③ 通过数字孪生技术能够在碳排放源锁定、碳排放数据分析、碳排放监管和预测预警等方面发挥重要作用。实时全景模拟仿真能源的生产、供给、交易、消费流程中，监测能源供给端和能源消费端的碳排放的全过程，支撑监管机构构建完整的碳排放监控体系，实现能源生产过程的精细化、在线化、智能化。

参考文献

1 刘振亚. 实现碳达峰、碳中和的根本途径. 电力设备管理, 2021, (3): 20-23.

2 吴张建. 面向碳中和的未来能源发展数字化转型思考. 能源, 2021, (2): 54-57.

3 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型. 资源科学, 2021, 43(4): 639-651.

4 巢清尘. “碳达峰和碳中和”的科学内涵及我国的政策措施. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 14-19.

5 童光毅. 基于双碳目标的智慧能源体系构建. 智慧电力, 2021, 49(5): 1-6.

6 于明, 张恩铭. “十四五”我国综合能源行业发展面临形势与趋势研判——深化新能源革命，力促碳达峰、碳中和. 中国科技投资, 2021, (10): 6-8.

7 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.

8 Zhou K L, Yang S L, Shao Z. Energy Internet: The business perspective. Applied Energy, 2016, 178: 212-222.

9 Jordehi A R. Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 893-905.

10 Kaur A, Kaushal J, Basak P. A review on microgrid central controller. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 338-345.

11 Asmus P. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.

12 Tuballa M L, Abundo M L. A review of the development of Smart Grid technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 710-725.

13 Sani A S, Yuan D, Jin J, et al. Cyber security framework for Internet of Things-based Energy Internet. Future Generation Computer Systems, 2019, 93: 849-859.

14 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.

15 Pratt R G, Balducci P J, Gerkensmeyer C, et al. The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO_2 Benefits. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Technical Information, 2010.

16 Wang J H, Huang Z H. The recent technological development of intelligent mining in China. Engineering, 2017, 3(4): 439-444.

17 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.

18 Dong L J, Sun D Y, Han G J, et al. Velocity-free localization of autonomous driverless vehicles in underground intelligent mines. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 9292-9303.

19 张帆, 葛世荣, 李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述. 煤

炭科学技术, 2020, 48(7): 168-176.
20 梁文福. 油田开发智能应用系统建设成果及展望. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 283-289.
21 Williams E. Environmental effects of information and communications technologies. Nature, 2011, 479: 354-358.
22 Hittinger E, Jaramillo P. Internet of Things: Energy boon or bane?. Science, 2019, 364: 326-328.
23 Sun K Y, Luo N, Luo X, et al. Prototype energy models for data centers. Energy and Buildings, 2020, 231: 110603.
24 de Vries A. Bitcoin's growing energy problem. Joule, 2018, 2(5): 801-805.
25 Jiang S R, Li Y Z, Lu Q Y, et al. Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of Bitcoin blockchain operation in China. Nature Communications, 2021, 12(1): 1938.
26 于海达, 杨秀春, 徐斌, 等. 草原植被长势遥感监测研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(7): 885-894.
27 张雪薇, 韩震, 周玮辰, 等. 智慧海洋技术研究综述. 遥感信息, 2020, 35(4): 1-7.
28 荣佳, 彭勃, 刘琦, 等. 碳市场对碳捕集、利用与封存产业化发展的影响. 热力发电, 2021, 50(1): 43-46.
29 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析. 热力发电, 2021, 50(1): 7-17.
30 蔡兆男, 成里京, 李婷婷, 等. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 602-613.
31 Wang Z H, Xue M T, Wang Y T, et al. Big data: New tend to sustainable consumption research. Journal of Cleaner Production, 2019, 236: 117499.
32 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学（D辑：地球科学）, 2007, 37(6): 804-812.
33 张军莉, 刘丽萍. 国内区域碳排放预测模型应用综述. 环境科学导刊, 2019, 38(4): 15-21.
34 谢高地, 李士美, 肖玉, 等. 碳汇价值的形成和评价. 自然资源学报, 2011, 26(1): 1-10.
35 吴振信, 石佳. 基于STIRPAT和GM(1,1)模型的北京能源碳排放影响因素分析及趋势预测. 中国管理科学, 2012, 20(S2): 803-809.
36 Hu Y C, Jiang P, Tsai J F, et al. An optimized fractional grey prediction model for carbon dioxide emissions forecasting. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(2): 587.
37 Fu C, Zhang S Q, Chao K H. Energy management of a power system for economic load dispatch using the artificial intelligent algorithm. Electronics, 2020, 9(1): 108.
38 El-Sehiemy R A, Rizk-Allah R M, Attia A F. Assessment of hurricane versus sine-cosine optimization algorithms for economic/ecological emissions load dispatch problem. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(2): e2716.
39 do Amaral Burghi A C, Hirsch T, Pitz-Paal R. Artificial learning dispatch planning for flexible renewable-energy systems. Energies, 2020, 13(6): 1517.
40 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息–物理–社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化：框架、技术与挑战. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 25-40.
41 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统：发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.

Path of Digital Technology Promoting Realization of Carbon Neutrality Goal in China's Energy Industry

CHEN Xiaohong[1,2] HU Dongbin[2*] CAO Wenzhi[1] LIANG Wei[1] XU Xuesong[1] TANG Xiangbo[1] WANG Yangjie[2]
（1 School of Frontier Crossover Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;
2 Business School, Central South University, Changsha 410083, China）

Abstract In the era of digital economy, digital technology is the best tool to achieve China's goal of carbon neutrality. The energy industry is the largest source of carbon emissions in China, and how to use digital technology to peak the carbon dioxide emissions and achieve carbon neutrality goal in energy industry has attracted widespread attention. The article first explains the important strategic role of digital technology in carbon neutrality, and then analyzes the related theoretical research and application progress of digital technology and carbon emission reduction in the literature, revealing the problems of current digital technology applied to carbon neutrality in energy industry. Finally, the article puts forward the general guidelines of digital technology to promote China's carbon neutrality process, as well as the main path of implementation of digital technologies, such as big data, digital twins, artificial intelligence, and blockchain, to assist the realization of carbon neutrality goal in China's energy industry.

Keywords digital technology, carbon neutrality, energy industry, path



陈晓红 中国工程院院士。湖南工商大学、中南大学教授、博士生导师。“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”国家基础科学中心主任。主要研究领域：决策理论与决策支持系统、大数据分析与智慧管理、中小企业融资、两型社会与生态文明等。
E-mail: cxh@csu.edu.cn

CHEN Xiaohong Academician of the Chinese Academy of Engineering, Professor and Ph.D. Supervisor of Hunan University of Technology and Business and Central South University. Director of the National Center for Basic Science of “Theory and Application of Resource and Environment Management in Digital Economy Era”. Her main research areas include decision theory and decision support systems, big data analysis and smart management, SME financing, resource conserving & environment friendly society and ecological civilization, etc. E-mail: cxh@csu.edu.cn



胡东滨 中南大学商学院教授、博士生导师。主要研究领域：决策理论与决策支持系统、大数据与人工智能、资源环境管理。E-mail: alanhdbin@csu.edu.cn

HU Dongbin Professor and Ph.D. Supervisor of Central South University. His main research covers decision theory and decision support systems, big data and artificial intelligence, resource and environmental management, etc. E-mail: alanhdbin@csu.edu.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author